切羽に出現しない弱層部がトンネル掘削に与える影響に関する基礎的研究

京都大学大学院　学生会員　○　賀島　諒太，緒方　奨
㈱奥村組　八尾　浩樹
京都大学工学研究科　正会員　岸田　潔

1. 研究の背景・目的

トンネルの周辺に力学的な強度の低い弱層部が存在していると，塑性域が拡大する要因となり，トンネルの変状や破壊につながることが知られている．また，大土被りでのトンネル建設においては，地圧・水圧が高くなるため，そのような条件下で材料強度の差異が，掘削挙動に及ぼす影響について検討する必要がある．

弱層部がトンネルに与える影響について，掘削途中のトンネル変位から切羽前方の地質状況を予測する手法の研究や，盤ぶくれの関する研究等はあるが，大土被りでの切羽に現れない側方に位置する弱層部の影響ついての研究はなされていない．本研究では，大土被りで切羽に現れないトンネル側方に位置する弱層部がトンネル掘削に与える影響を土被りと弱層部の位置をパラメータとして，数値解析により検討を行った．

2. 解析概要

解析は，Hoek-Brown の破壊規準を用いた弾塑性解析を有限差分法（FLAC）で実施した．

まず，解析モデルを**図-1** に示す．トンネル直径と弱層の幅を 10 m ，土被りを 100 m または 300 m とした．領域と境界条件については，一般的に用いられている事例[1)]を参照し，トンネル直径を 1D として，側方に 5D，下方に 4D の領域を設定し，境界条件は，側方をローラー支点，下方をピン支点とした．また，初期応力状態については，文献 1)に示されている事例から，以下の式(1)によって与えた．なお，H は土被りの深さである．

$$K_0 = \begin{cases} 0.25 + 0.015H & (H \leq 50\ \mathrm{m}) \\ 1.0 & (H > 50\ \mathrm{m}) \end{cases} \tag{1}$$

地盤材料の破壊規準には，以下に示す Hoek-Brown の破壊規準[2)]を用いた．

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \tag{2}$$

ここで，σ_{ci} は一軸圧縮強さ，m_b, s, a の各無次元パラメータは岩盤の不連続度合を表す指標である GSI や，掘削による地盤の乱され度合の指標 D_{GSI}，パラメータ m_i によって決定される[2)]．GSI は，0 ~ 100 のレンジで示される数値で，0 に近いほど不連続性は大きくなる．また，m_i は GSI が 100 の時の m_b であり，Marinos and Hoek[3)] が既往の実験値をまとめた表を参考にする．また，GSI システムでは，ヤング率 E は σ_{ci} < 100MPa では次のように設定される[2)]．

$$E = \left(1 - \frac{D_{GSI}}{2}\right)\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\,10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \tag{3}$$

ここで，ヤング率 E の単位は GPa になる．

本解析では，トンネル壁面から弱層部までの距離 X を 0.1D, 0.25D, 0.5D, 1.0D と変化させたケースと弱層なしのケースの解析を行った．解析に用いた地山の物性値を**表-1** に示す．

3. 解析結果と考察

スプリングライン上の観測点での地山特性曲線を**図-2** に示す．まず，土被りが 100m の時は，X = 0.5D, 1.0D は同じような直線的な挙動を示している．つまりこれ

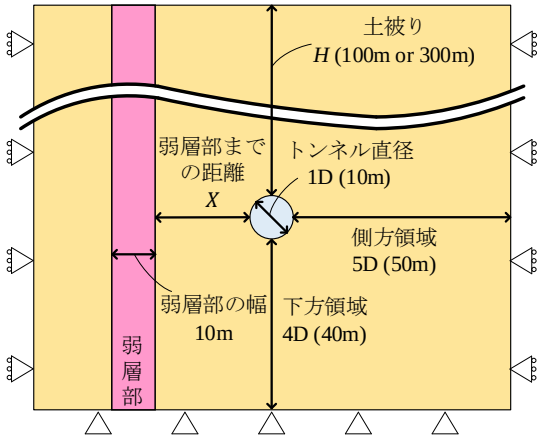

図-1 解析モデル

表-1 地山の物性値

	健岩部	弱層部
密度 ρ [tf/m^3]	2.70	2.65
一軸圧縮強さ σ_{ci} [MPa]	37.3	3.1
材料定数 m_i	7	20
D_{GSI}	0.7	0.7
GSI	40	20
ポアソン比 ν	0.25	0.3
ヤング率 E [MPa]	2.23×10^3	2.04×10^2

キーワード　トンネル，数値解析，弱層部，地山特性曲線
連絡先　〒615-8246　京都市西京区京都大学桂 C1-2 338 号室 京都大学大学院工学研究科　TEL : 075-383-3231

のケースと弱層部がない場合，応力解法率が 60 %までらのケースでは 60%まで弾性的な挙動を示していると考えられ，この範囲では弱層の影響はトンネル掘削挙動に現れない．一方，$X = 0.25D$ では，初期は直線的な挙動を示すが，変位は他のケースよりも多く発生する．つぎに，土被りが 100 m と 300 m のケースにおいての同一観測点での地山特性曲線を**図-3** で比較する．土被りが 300 m のケースでは，弱層がない場合は応力解放率 50 %の段階から塑性的な挙動を示している一方で，弱層部がある場合は応力解法率 40 %の段階から塑性的な挙動を示しており，弱層部が近いほど塑性的な挙動は大きくなり，最終的な変位は大きくなっている．つまり，弱層部が近いほど，掘削の進行に伴い急激に変位が増大し，塑性的な挙動が卓越すると考えられる．また，土被りが大きいほどより低い応力解放率で塑性的な挙動が見られ，掘削のより早い段階で変位の急激な増大が発生すると予想される．上記よりトンネルの周辺が比較的に健岩に囲まれていても，弱層が近接する場合，塑性的な挙動が見られ，急激に壁面の変位が増大することが考えられ，土被りが大きいほどより早い掘削段階でこの傾向が見られることが判明した．

つぎに，応力解放率 40 %における，周辺の地山に弱層部がない場合と，弱層部がトンネル側方 $X = 0.1D$ に存在する時の最大せん断ひずみの分布を**図-4** に示す．まず，土被りが 100 m で周辺地山に弱層部がない場合は，空洞周辺で僅かにせん断ひずみが大きくなっている．一方，弱層部が $X = 0.1D$ と近接している時，空洞壁面から弱層部周辺にかけてのスプリングライン延長線上においてせん断ひずみが卓越する箇所が現れることが確認できる．また，土被りが 300 m の場合は弱層部が $X = 0.1D$ と近接している時，弱層部とは逆側の空洞壁面からスプリングライン延長線上においてもせん断ひずみが卓越した箇所が現れ，全体的に最大せん断ひずみは土被りが 100 m の場合より大きくなっている．

4. まとめ

本研究では，切羽に現れない弱層部がトンネル掘削に与える影響について数値解析を行った．解析結果から，土被りが大きいほど，地山特性曲線はより低い応力解放率で塑性的な挙動を示すとともに，弱層の影響によるせん断ひずみの発生がより顕著になることが分かった．

参考文献

1) 土木学会トンネル工学委員会編：山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務，トンネル・ライブラリー第 16 号，pp.150-160，2006.

2) Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B.: *HOEK-BROWN FAILURE CRITERION* - 2002 EDITION, 2002.

3) Marinos, P., Hoek, E.: GSI: *A GEOLOGICALLY FRIENDLY TOOL FOR ROCK MASS STRENGTH ESTIMATION*, 2000.

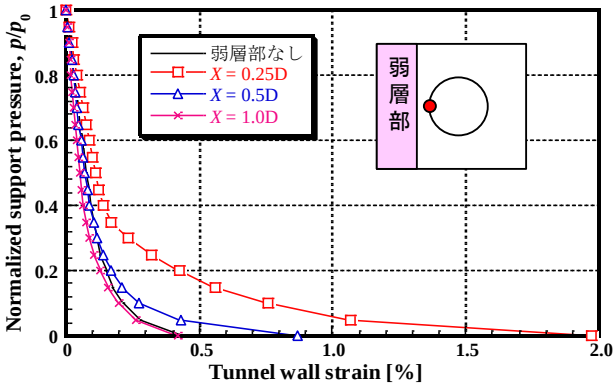

図-2 土被り 100m での弱層部に近い壁面の地山特性曲線

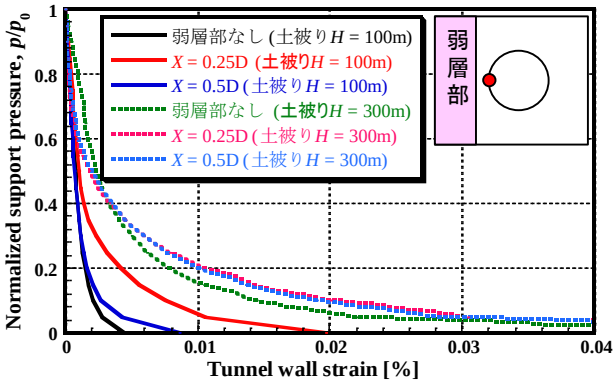

図-3 各土被りでの弱層部に近い壁面の地山特性曲線

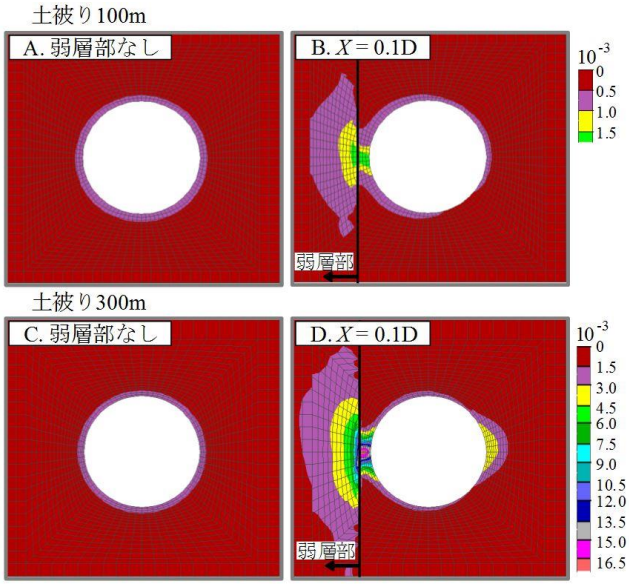

図-4 最大せん断ひずみの分布